

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13864

研究課題名(和文) 形態が複雑化・大規模化する建築構造物に対する効率的な非線形解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of efficient nonlinear analysis method for large and complicated building structure

研究代表者

藤田 慎之輔 (Shinnosuke, Fujita)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：80775958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の釣り合い変位を求める方法として、直接法と間接法の2種類があり、後者のアルゴリズムに適応再スタート付加速勾配法(以下、AGM)を適用した時の有効性を様々な数値実験を通じて検証した。その結果、勾配法の収束性能はステップ幅の決定方法に大きく左右され、AGMを適用する場合は固定ステップ幅とするほうが計算効率が高く、大規模問題になればなるほど、固定ステップ幅を採用したAGMは他のアルゴリズムと比較して早期に釣り合い変位に到達できることが確認された。また、上記の結果は材料非線形問題においても一般性を損なわないことが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、適応再スタート付加速勾配法により全ポテンシャルエネルギー最小化を行うことによって釣り合い変位を求めれば、規模の大きな問題に対しては従来の方法よりも計算時間を短縮できる可能性が示された。このことは、近年、益々形態が複雑化・大規模化する建築構造物に対して、非線形解析を短時間で行うことは困難となりつつある状況に対して、計算時間の肥大化を抑え、設計プロセスにおけるトライアル・アンド・エラーの機会を確保する一助となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：There are two types of methods for determining the balanced displacement of a structure, the direct method and the indirect method. The former solves the stiffness equation, and the latter minimizes the total potential energy. The effectiveness of the latter algorithm when applied to the accelerated gradient method with adaptive restart (AGM) was verified through various numerical experiments. As a result, it is confirmed that the convergence performance of the gradient method is greatly affected by the method of determining the step width, and the computational efficiency is higher when the AGM is applied with a fixed step width. It is also confirmed that the above results are general enough for material nonlinear problems.

研究分野：建築構造

キーワード：加速勾配法 全ポテンシャルエネルギー最小化 剛性方程式

1. 研究開始当初の背景

近年、最適化手法を用いて、一定の合理性を持った建築構造形態を創出する研究が発展し、主に構造計画の初期段階においてそのような形態創生手法が利用されるようになり、コンピューショナルデザインとして一分野を確立しつつある。ただし、それらの手法は主に静的線形弾性範囲において優良な形態を模索するものであり、実施設計においては、幾何・材料非線形を考慮した解析を行った上でトライアル・アンド・エラーを繰り返すこととなる。コンピューショナルデザインによって得られた形態は、新国立競技場のコンペ案などに代表されるように、古典幾何学にとらわれない複雑な形態を有するものが多く、そのような建築構造物に対して非線形解析を行うことは膨大な計算負荷を伴うものとなる。また、施工技術、解析技術の加速的発展の後押しを受け、建築構造物の大規模化も顕著であり、過去に例のない高さの超々高層ビルなどの建設が次々に実現される時代となっている。建築における構造設計とはトライアル・アンド・エラーの繰り返しによって最適な構造を模索する行為である。解析時間が肥大化することは、トライアル・アンド・エラーの機会を奪ってしまうことに繋がるため、従来の方法に代わる高速な数値計算アルゴリズムの構築が望まれている。

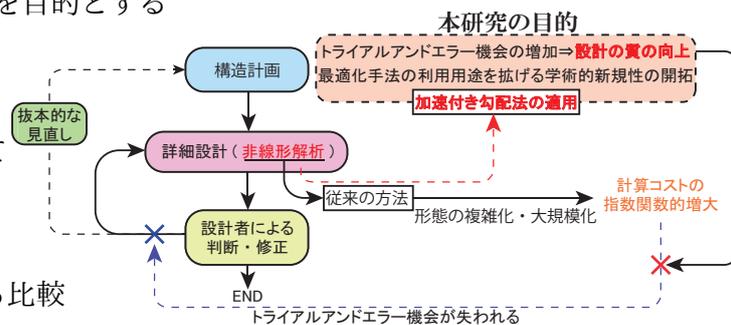
2. 研究の目的

申請者は、建築構造以外の分野において、ビッグデータに対する機械学習などに用いられている加速付き勾配法が、大規模最適化問題を解く効果的な解法である点に着目し、加速付き勾配法を構造物の非線形解析に応用し、大規模問題に対する計算時間を短縮することで、構造物の設計の質の向上に寄与するとともに、建築分野においては形態解析に専ら使われてきた最適化手法の新しい応用事例を提示することで、建築分野における最適化技術の学術的発展に寄与することを目的とする

3. 研究の方法

構造物の非線形問題に対して

- 勾配法の別による比較
- ラインサーチの方法による比較
- 計算対象の規模による比較



の3つのパラメータに対して数値実験を行うことで、剛性方程式を直接解く方法(直接法)ではなく、全ポテンシャルエネルギー最小化問題を解く方法(間接法)によって構造物の非線形解析を行う際、加速勾配法を用いると大規模問題に対しては計算コストが他の解法と比較して小さくなるという仮説を確かめる。また、プログラミング言語をPythonに揃えた同一の条件のもとで、直接法のアルゴリズムとして一般的なスカイライン法のコードを実装し、直接法そのものとの収束性能の比較を行う。

4. 研究成果

(1) 材料非線形問題への有効性の確認

まず、要素数 m 、節点変位の自由度 D の図 1 に示す立体トラスに対して、集中荷重 $P = \frac{20000}{M^2}$ [kN] を作用させた時の釣り合い経路を全ポテンシャルエネルギー最小化により求める数値実験を行った。

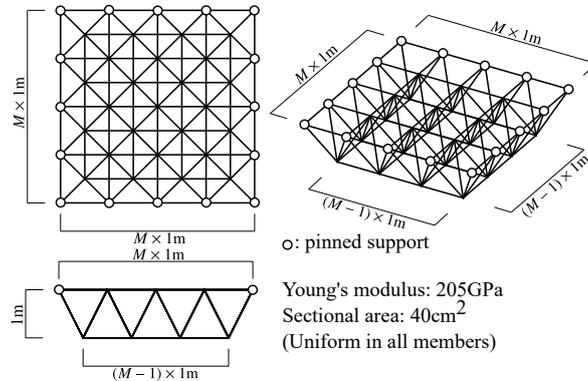


Figure 1: 解析モデル

ステップ幅を $\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$ で固定値とした適応再スタート付加速勾配法 (AGM)、各最適化ステップごとにラインサーチをおこなってステップ幅を逐次定めた場合の適応再スタート付加速勾配法 (AGM*) に加え、比較の対象として共役勾配法 (CG)、準 Newton 法 (BFGS)、truncated-Newton 法 (TNC) によっても同一の全ポテンシャルエネルギー最小化問題を解き、収束性能の比較を行った。様々な材料特性を有する構造物に対する収束性能の差異を検証するために、本研究では

1. 線形弾性モデル
2. バイリニア型モデル (図 2)
3. 高次非線形型モデル (図 3)

の 3 つの異なる材料特性を有する場合について比較検証を行った。

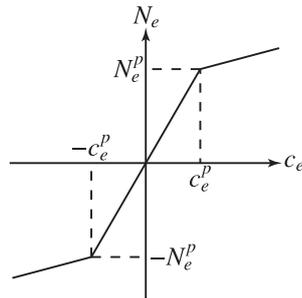


Figure 2: Axial force-elongation relationship (bilinear type)

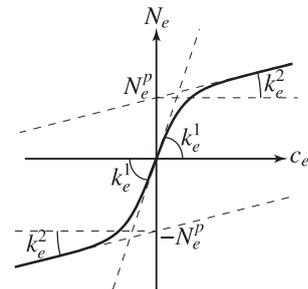


Figure 3: Axial force-elongation relationship (high order nonlinear type)

その結果、どの材料特性に対しても大規模な問題に対しては AGM が最も収束性能が高いことが確認された。

(2) ステップ幅の設定方法の違いによる収束性能の比較

(1) の研究結果から、AGM が大規模問題に対して有効であることが材料非線形問題に対しても確かめられたが、AGM* は収束性能が良好ではなかったことから、ステップ幅の決

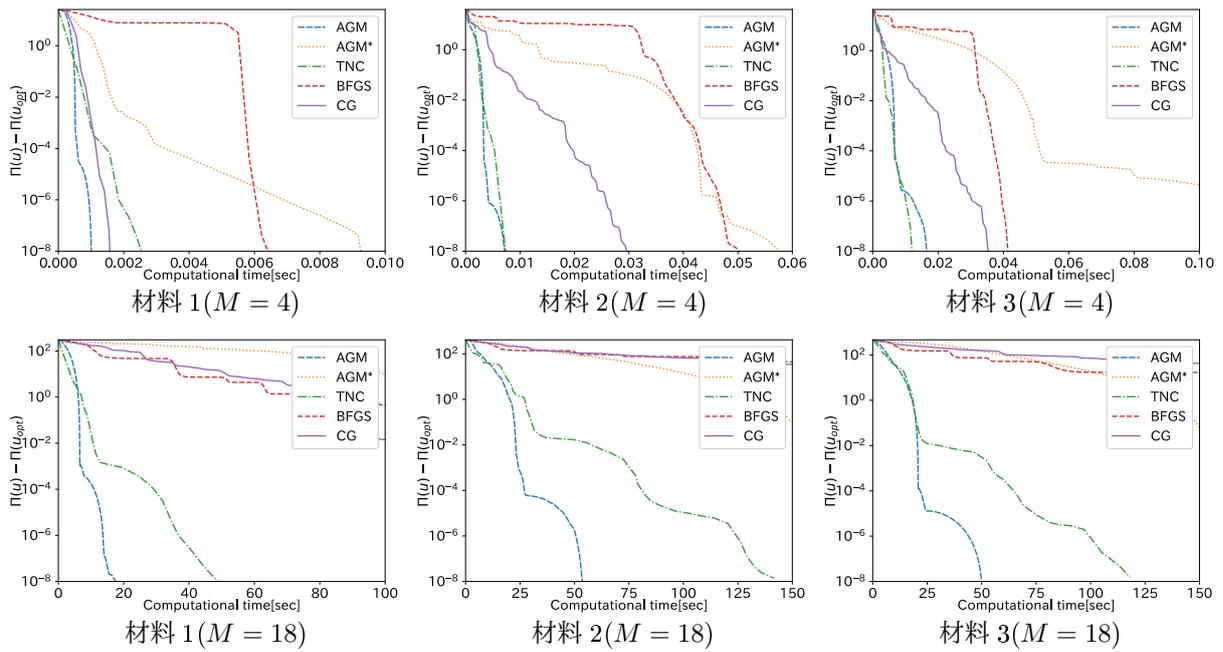


Figure 4: 各種法による収束性能の違い ($M = 18$ の場合, 全てのケースで AGM が最速)

定方法が収束性能に大きな影響を及ぼすことが推察された。そこで, SDM(最急降下法), CG(共役勾配法), AGM(適応再スタート付加速勾配法) の3つの勾配法に対して, gershgorin の定理に基づいて決定した固定ステップ幅を用いる場合 (gershgorin), armijo 基準によるバクトラック法によりラインサーチを行う場合 (armijo), 黄金分割法によりラインサーチを行う場合 (golden) の3ケース, 合計9ケースについて図5のような解析モデルに自重を作用させた時の全ポテンシャルエネルギー最小化問題を解き収束性能の比較を試みた結果, やはり (1) における AGM(固定ステップ幅とした適応再スタート付加速勾配法) が大規模問題に対しては最も収束性能が高いことが数値実験により明らかとなった。

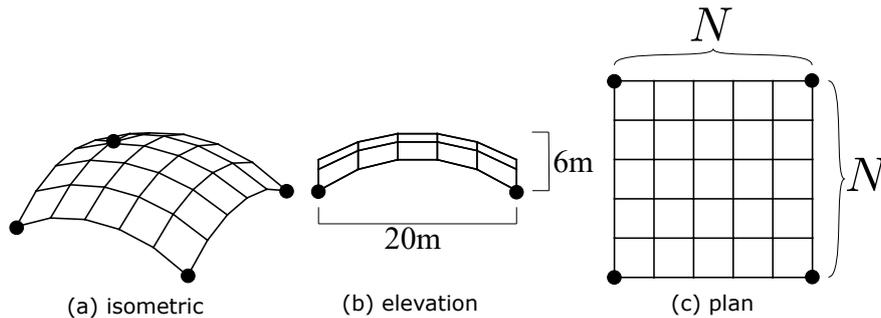


Figure 5: Analytical model (ex. $N = 5$)

(3) 直接法と間接法の比較

(1) (2) の研究結果から, 大規模問題に対しては AGM が有効であることは確かめられたが, それはあくまで全ポテンシャルエネルギー最小化問題を解く方法 (間接法) に対して勾配法同士を比較した際の優劣であり, 剛性方程式を直接解く方法 (直接法) との比較はおこなっていなかった。そこで, 直接法のアルゴリズムとして一般的であるスカイライン法を Python で1から実装し, 勾配法の実装も Python により行い条件を揃えた状態で, 直接法と間接法の比較を行った。図5と同様の問題を解いた結果, 規模の大きな問題に対し

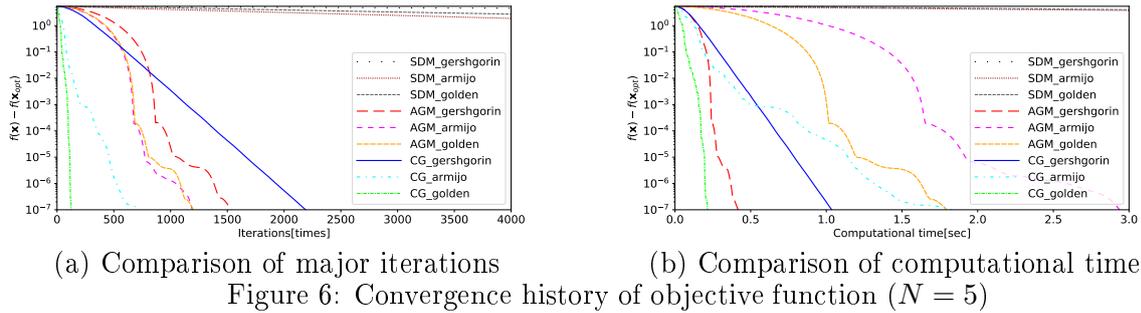


Figure 6: Convergence history of objective function ($N = 5$)

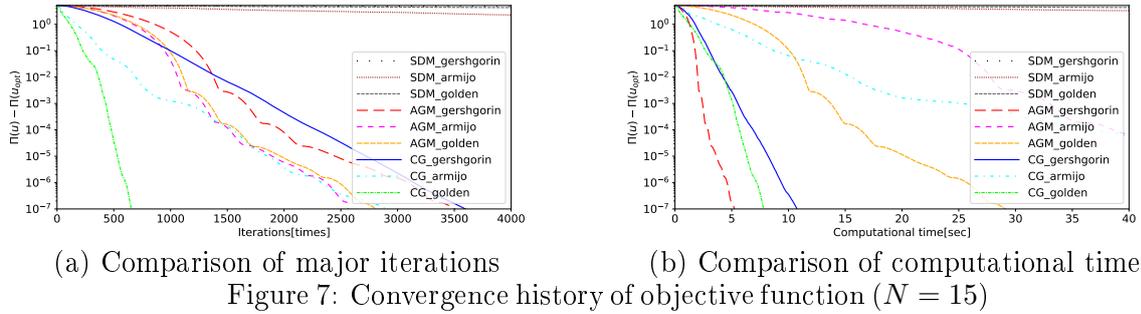


Figure 7: Convergence history of objective function ($N = 15$)

てはスカイライン法による直説法は不利であり、間接法の方が計算コストが低いことが確認された。

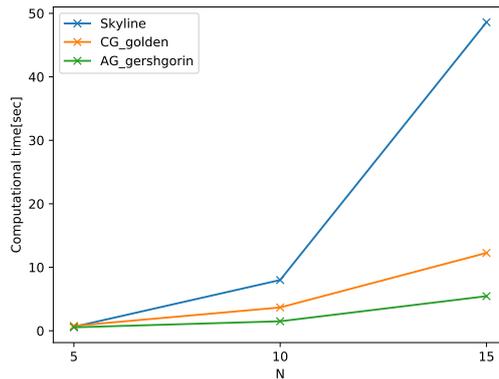


Figure 8: 解析モデルの規模の違いによる直接法と間接法の計算時間比較

(1) ~ (3) の研究結果から得られた結論は次のとおりである。

- 問題の規模が小さい場合、AGM は収束性能が悪い。
- 大規模問題になればなるほど、AGM は他のアルゴリズムと比較して早期に釣り合い変位に到達できる。
- 勾配法の収束性能はステップ幅の決定方法に大きく左右され、AGM を適用する場合は固定ステップ幅とするほうが計算効率が高い。
- 直接法との比較においても、大規模問題においては AGM による間接法の方が早期に釣り合い変位に到達できる。
- 上記の結果は材料非線形問題においても一般性を損なわない。

本研究結果より、間接法のソルバとして AGM を利用すれば、大規模な解析モデルに対する非線形解析に要する計算コストを低減できる可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 藤田慎之輔, 寒野善博	4. 巻 84
2. 論文標題 非線形弾性材料からなるトラスの釣合い解析法への加速勾配法の適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1223, 1230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.1223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤井文人, 藤田慎之輔
2. 発表標題 勾配法による構造物の釣合解析に関する数値実験
3. 学会等名 第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田慎之輔, 寒野善博
2. 発表標題 構造物の釣合解析への最適化技術の適用
3. 学会等名 コロキウム構造形態の解析と創生2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujita
2. 発表標題 Numerical experiments on equilibrium analysis of structures by gradient methods
3. 学会等名 Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020), Kobe, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Shibu, S. Fujita
2. 発表標題 Numerical experiments on elastic analysis of structural frames using gradient and skyline methods
3. 学会等名 第60回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関